

次世代無線通信に向けた光学的手法によるテラヘルツ信号発生

日大生産工(院) ○吉田 靖典 中村 海稀

日大生産工(学部) 井上 雄太 堤 陽人 恩田 健生

日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

1. まえがき

移動体通信、IoT連携、遠隔地医療の進歩を支えるため、大容量無線通信システムに対する要求が高まっている。加えて、6G に向けて未開領域であるミリ波帯やテラヘルツ波帯の開拓が急務となっている¹⁾。従来の手法である電気的手法では、水晶発振器や位相同期回路、電圧制御型発振器等で構成される通倍回路を用いて目的の周波数を生成している。この手法の課題は、物理的上限や通倍器によって雑音も同様に増幅する事で、ミリ波を超える高い周波数帯で用いた際に伝送品質の劣化や、伝送速度の制限などが生じる。誤り訂正技術などによりビット誤りには対策できるが大容量高速無線通信のボトルネックとなってしまう。我々は光周波数コムという特殊な光源と光電変換を導入する事で、光周波数コムの特徴である低位相ノイズ性、振幅・位相の高度変復調を用いた超高速・大容量な次世代無線通信を目指している。

具体的に本講演では、電気光学変調 (EO) コムを用いたテラヘルツ波の発生と伝送について報告する。EOコムを用いることで、光電変換からテラヘルツ波を直接低ノイズ条件で発生させることができる²⁾³⁾

2. 提案手法と実験装置系

電気光学(EO)効果を用いたEOコムを発生させる。線幅 7 Hz、中心波長 1552.5 nmの連続波半導体レーザー (CW-LD)を種光源として用いた。CW-LDからの光は光コム発生に利用される。光位相は、強度変調器(IM)と位相変調器(PM)を用いて、信号発生器出力の25 GHz正弦波信号で変調した。種光源は、PMによりアップチャープとダウンチャープに周期的に変調される。線形アップチャープ部分は強度変調器で抑圧される。その後、チャープされた光は分散補償ファイバーを通過することで分散補償され、パルス圧縮される。EOコムは、EO効果を利用して生成される光周波数コムである。光コムの発生に光共振器を用いないため、共振器長の制約を受けず、高繰り返しパルス列

を発生できる。この方法により、25 GHzのフェムト秒光パルスを生成することができる。自然放出増幅光雑音(ASE Noise)の影響を低減するため、Fabry-Pérotフィルタに入れる事でASE Noiseを抑圧する。中心の光コム縦モードの1本と300 GHz離れた光コム縦モードを1本切り出す。光信号対雑音比(OSNR)が50 dB以上の2つのコムモードに対して光電変換を行うと、信号対雑音比(SNR)の高いテラヘルツ波の発生が観測されることが明らかになっている³⁾。2本のコムモードを可変光減衰器で強度比を揃え合波させる。その後適切な電力まで増幅し、OE変換素子である単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) に入射して光差周波数発生による300 GHzの搬送波を発生させ、テラヘルツ波を送信する。サブハーモニックミキサ(SHM)を用いて中間周波数(IF)にダウンコンバートし、IFを100 MHz程度に調整する。その際用いるローカル用の信号発生器は、12.495 GHz程度とし、24通倍することによって299 GHz付近となるため、IFを調整することができる。IFを位相雑音測定器で測定することによって位相雑音の評価を行う。長期安定性を評価するため周波数カウンタとパソコンで周波数を記録し、パソコンにてAllan偏差を評価する。

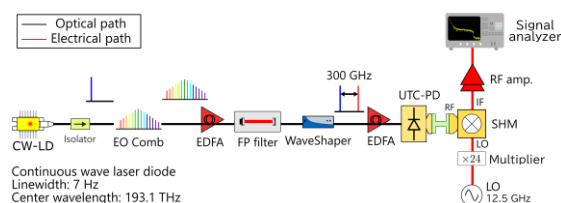


Fig. 1 実験配置図

CW-LD: Continuous wave laser diode, OBPF: Optical band-pass filter, EDFA: Erbium-doped fiber amplifier, UTC-PD: Uni-traveling-carrier photodiode, FP filter: Fabry-Pérot Filter, RF amp.: Radio frequency amplifier, SHM: Sub-harmonic mixer, WaveShaper: Arbitrary Waveform Generator

3. 実験結果及び考察

初めに伝送に必要な帯域幅を持ったEOコムを発生させた。モード間隔 25 GHz、半値全

Photonics-Based Terahertz Signal Generation for Next-Generation Wireless Communications

Yasunori YOSHIDA, Mitsuki NAKAMURA, Yuta INOUE, Haruto TSUTSUMI,
Takeru ONDA, Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

幅 5.832 nm の平坦なEOコムが生成された。その結果をFig. 2に示す。EDFAの増幅自然放出(ASE)ノイズは-65 dBのレベルで観測した^{3),4)}。光スペクトラムアナライザのダイナミックレンジの問題で50 dB以上は観測できないが、発生したことを確認している⁴⁾。

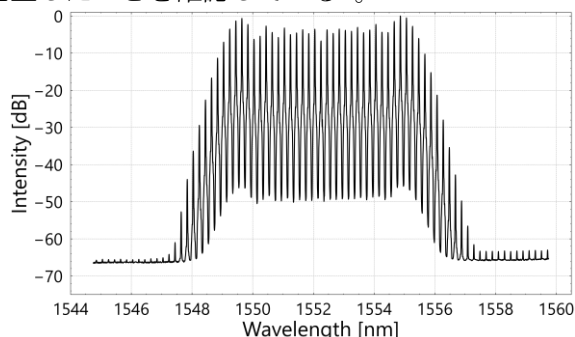


Fig. 2 EO コムスペクトラム

UTC-PDを用いて生成した搬送波300 GHzをH型導波管によりSHMを直接接続し導波管内を伝送させた。Fig. 1の構成においてIFのSNR 55 dB以上を持つ300 GHzの信号を確認した(Fig. 3)。

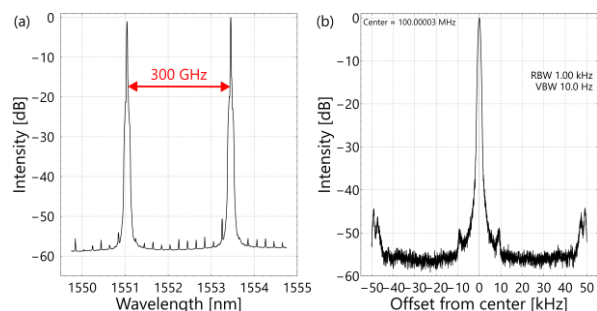


Fig. 3 (a) 300 GHz 間隔光コム縦モード, (b) IF スペクトラム

OSNRでは、60 dBだが、IFのSNRは55 dB程度なので、ほぼロスレスで光電変換出来たが、SHMの損失が大きいため5 dBほど劣化している。IFの位相雑音をFig. 4に示す。

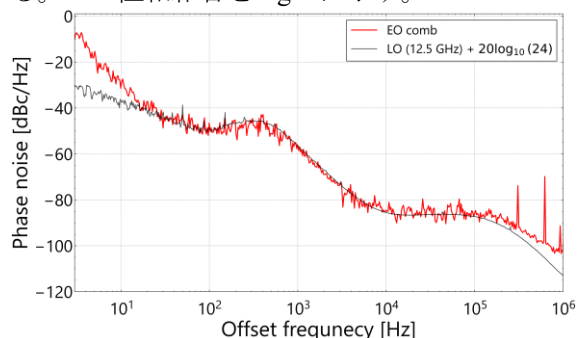


Fig. 4 300 GHz における位相雑音

搬送波 300 GHz の位相雑音は直接測定出来ないで、IFにダウンコンバートして間接測定を行う⁵⁾。この手法による計測では、逡倍してダ

ウンコンバートするため、位相雑音が劣化している。そのためLOの位相雑音の支配が大きく測定が困難であることが、現在この周波数を取り扱っている分野の研究者では、喫緊の課題である。そのため新しい測定の開発方法の検討を行っている。

4. まとめ

ASEが抑制されたEOコムと、UTC-PDを用いた光差周波発生により、テラヘルツ波の発生、測定に成功した。高フィネスのFabry-Pérotフィルタを用いASEノイズ等の雑音に対して65 dB以上を確保した。OSNR 65 dB以上ある信号は、光電変換時に少量の光においても、UTC-PDの光電流を増加させることが出来、省電力化に繋がる。また高品位なテラヘルツ波発生にも繋がるため改善が必要である。

参考文献

- 1) R. Krishan, Terahertz Wireless Communication Components and System Technologies, Springer, (2022), pp. 153-161.
- 2) Y. Matsumura, et al, "Carrier conversion from terahertz wave to dual-wavelength near-infrared light for photonic terahertz detection in wireless communication," Opt. Express **31**, 33103 (2023).
- 3) Y. Kikkawa, et al, " Sub-30-fs fibre-coupled electro-optic modulation comb at 1.5 μ m with a 25-GHz repetition rate," Electron. Lett. **59**, 1 (2023).
- 4) A. Ishizawa, et al, Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy," Sci. Rep. **13**, 8750 (2023).
- 5) M. Kasprzak, "Additive phase-noise in frequency conversion in LLRF systems," arXiv preprint arXiv:1806.09247 (2018).